

气候变化影响下藏东南帕隆藏布流域 高山区泥石流的地貌效应

余国安¹, 鲁建莹^{1,2}, 李志威³, 侯伟鹏^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 高海拔或高纬度山区(尤其高山冰川及冻土急剧消退区)常孕育适宜泥石流发育的地形和物源条件。气候变化(如升温、强降雨事件增多等)影响下,高山区潜在孕灾环境更易于成灾,泥石流成为主要的灾害类型和物质输移方式,也是高山区地貌变化的重要驱动力。由于野外监测困难,数据资料匮乏,鲜有针对高山区泥石流过程地貌效应的分析报道。以中国藏东南高山区泥石流多发的帕隆藏布流域为研究区,以古乡沟、天摩沟和扎木弄沟为典型小流域,结合遥感影像、DEM数据、无人机航拍、高精度RTK测量和野外踏勘调查,分析泥石流沟道地貌发育特征(冲淤变化、平面摆动)及其对主河河流地貌的影响,并探讨大规模泥石流事件影响下河谷地貌的长期演变趋势。高山区泥石流过程强烈塑造沟道自身地貌,上游物源区深切展宽和溯源蚀退,沟口堆积扇冲淤变化受控于泥石流事件规模和水流强度。泥石流过程显著影响主河道河流地貌,造成主河道横向冲淤和摆动,并影响堰塞体上游河段平面形态发育。长时间尺度上,河谷地貌在平面上发育形成宽窄相间的藕节状而在纵剖面上形成台阶状形态。

关键词: 泥石流;藏东南;高山区;地貌效应;长期演变

DOI: 10.11821/dlxb202203009

1 引言

高海拔或高纬度山区(简称高山区)是全球地貌架构的重要组成部分。在气候变化的大背景下,近几十年来,国内外高山区冰川、冻土、积雪整体上多处于快速消融退缩状态^[1-3],这些区域(尤其高山冰川、冻土急剧消退区)常孕育适宜泥石流发育的地形和物源条件。泥石流成为高山区主要的灾害类型和物质输移方式,也是区域地貌变化的重要驱动力。

尽管高山区泥石流的起动区多为人迹罕至的高山冰雪/冻土坡面(或上游沟谷),但由于其流速高,演进距离长,且在演进过程中规模常会显著增大,因而这类泥石流过程多破坏力巨大,易造成下游基础设施及居民生命财产的重大损失。高山区众多典型泥石流灾害事件,如1962年和1970年秘鲁安第斯山脉Rio Santa山谷泥石流^[4]、2002年俄罗斯高加索山区北奥赛梯Kolka-Karmadon冰川泥石流^[5]、2010年加拿大Meager山区泥石流^[6]、2012年和2017年瑞士阿尔卑斯山区Bondasca山谷泥石流^[7]、中国藏东南、川西贡

收稿日期: 2021-06-02; 修订日期: 2021-12-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505201); 国家自然科学基金项目(41971010); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0903) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2018YFC1505201; National Natural Science Foundation of China, No.41971010; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No.2019QZKK0903]

作者简介: 余国安(1978-), 男, 安徽怀宁人, 博士, 副研究员, 研究方向为泥沙运动、河流地貌及灾害。

E-mail: yuga@igsrr.ac.cn

嘎山及新疆天山地区等多发的冰川（或冰雪—降雨耦合）泥石流，以及2021年印度北部北阿肯德邦喜马拉雅山地冰湖溃决泥石流等表明，应高度重视高山区泥石流的现实危害和潜在风险。

泥石流运动伴随强烈的侵蚀—搬运—堆积过程，不但沟道自身发生强烈冲淤变化，还输送大量泥沙进入主河，改变河道水沙过程和地貌形态，并影响河谷地貌的长期演变，因而具有显著的地貌效应^[8-11]。由于泥石流过程通常伴随上中游沟道的强烈冲蚀和下游沟道剧烈淤积，相关研究致力于明晰影响泥石流冲刷能力和淤积规模的主要因素^[12-13]，如分析沟道坡度^[14-15]和泥石流流体物质构成（水分含量、颗粒粒径）^[16]等与泥石流侵蚀能力和堆积特征的关系；探讨泥石流流变特性对冲积扇地貌形态的影响^[17]等。另外，对泥石流沟纵剖面演化模式^[18]、泥石流底蚀^[19]和侧蚀^[20]过程作用机制、不同地貌特征的泥石流沟发育类型^[21]，以及泥石流与主河交汇机理^[22]等方面也开展了探索。

近年来，尽管气候变化及其灾害过程对高山区地貌的影响逐渐受到关注^[23-24]，但由于监测困难，数据资料匮乏，有关高山区泥石流的地貌效应仍鲜有研究报道。受气候变化（升温 and 降雨增多）的影响，高山区潜在孕灾环境更易于成灾，泥石流的频率和规模均可能发生不利变化。理解高山区泥石流地貌效应有助于泥石流灾害的合理避让和风险控制，不但有重要的科学价值，而且是紧迫的现实需求。本文以中国藏东南地区高山泥石流频发的帕隆藏布流域为研究区，分析典型泥石流沟谷冲淤变化和沟道地貌发育特征，阐明泥石流事件对主河河流地貌的影响，并探讨大规模泥石流事件影响下区域河流地貌的长期演变。

2 研究区及研究方法

2.1 研究区域

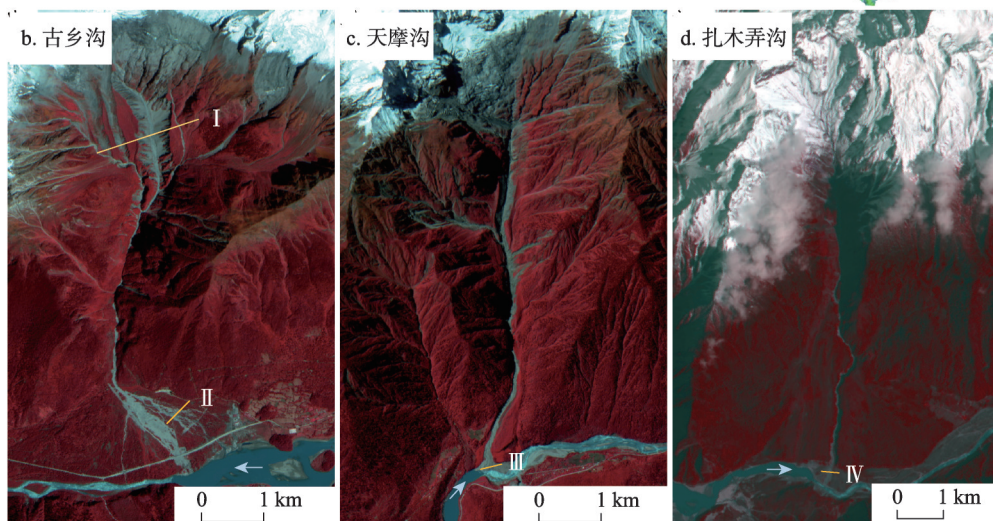
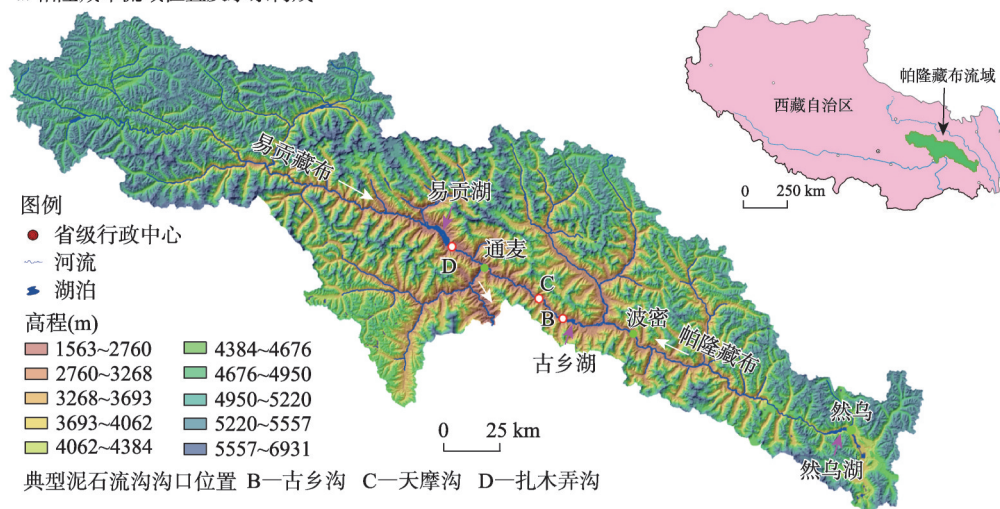
帕隆藏布流域位于藏东南雅鲁藏布江大拐弯北部，是雅鲁藏布江下游主要支流（图1），其流域面积约2.86万km²，干流河长266 km，落差3380 m，平均坡降12.7‰，多年平均年径流量约300亿m³^[25-26]。这一区域地层岩性以中—深变质岩为主，包括片岩、片麻岩、变粒岩、角闪质岩、大理岩等，局部出露花岗岩^[27]。区域地处东喜马拉雅构造结，地壳新构造运动强烈，抬升显著，地震频率高^[26]。这里山高坡陡谷深，地形变化剧烈。由于地处西南季风进入青藏高原的重要水汽通道上，帕隆藏布流域降水丰沛，海洋性冰川广布^[28]。受区域地层岩性、地壳运动、地形地貌、气候、人类活动等因素的共同影响，流域内山地灾害多发，灾害点广泛分布^[26, 29]。20世纪60年代以来，帕隆藏布流域气温和降雨发生明显变化，尤其升温趋势十分显著（图2）。在这一背景下，流域内海洋性冰川快速消融退缩^[1, 30]，大量松散冰碛物外露。气候变化使流域潜在孕灾环境更易于成灾，客观上促进了泥石流灾害发生^[31]，改变或重塑沟谷乃至流域地貌过程。

选取帕隆藏布流域3条泥石流多发小流域（古乡沟、天摩沟和扎木弄沟）为研究对象（图1b~1d），分析沟道自身地貌发育特征及泥石流事件对主河河流地貌的影响。3条流域近期泥石流活动都较为活跃（表1），成因主要包括降雨、升温导致的滑坡、冰/岩崩等，以土力类过程触发形成泥石流为主。3条流域泥石流的发育历史涵盖近百年至十年，一定程度上可反映不同发育阶段泥石流沟道的变化特征。

2.2 研究方法

对研究区河道和典型泥石流沟谷进行野外实地踏勘调查。采用图帕斯（TruPulse 200，量程1000 m ±20 cm）激光测距仪测量沟道（河道）地形（距离、高差、坡度等）；

a. 帕隆藏布流域位置及水系构成



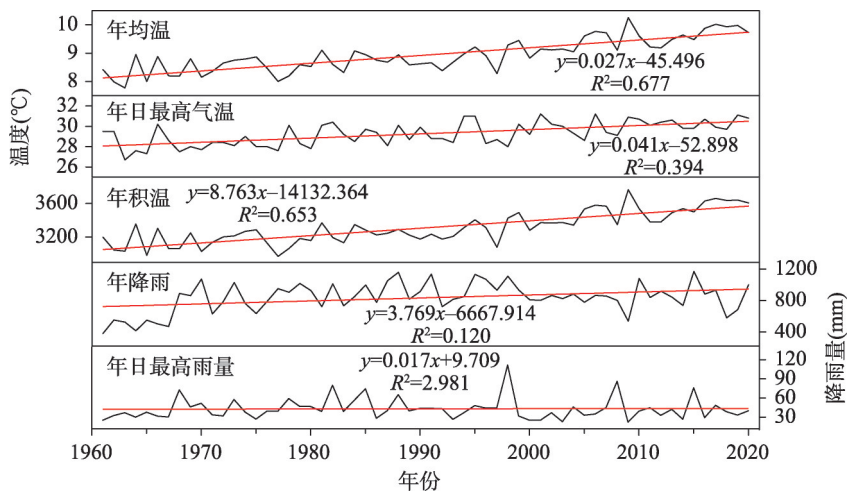
注：图b~c为2016年资源3号卫星影像；图d为2018年Landsat 8影像；虚线I-IV为横断面位置。

图1 帕隆藏布流域及3条典型泥石流沟示意图

Fig. 1 The Parlung Zangbo basin and three typical debris flow gullies

使用无人机 (DJI Phantom 4 Pro) 航拍沟道出口冲积扇地形；同时布置参考控制点，采用高精度RTK系统 (合众思壮G970II Pro) 测量以矫正航测数据高程误差。航拍影像经Pix4D mapper、Cloud Compare、ArcMap软件处理，获得亚米级精度DEM数据。目前在典型泥石流沟道出口冲积扇开展4次无人机航拍 (时间分别为2020年5月中旬、9月下旬和12月上旬、2021年5月中旬)，以精细记录年内汛前和汛后泥石流冲积扇冲淤变化和流道摆动。由于研究区谷深坡陡，地形变化大，沟道的流通段和物源区未进行航拍。

搜集整理研究区典型泥石流事件和地貌过程有关历史文献资料。下载SRTM 3 (90 m精度)、ASTER GDEM V3 (30 m精度) 高程数据，运用ENVI、ArcGIS软件对DEM数据进行坐标系转换、几何校正、裁剪拼接等处理，提取河道纵剖面 and 典型沟道地形。基于Google Earth数据得到古乡沟上游物源区横断面。在USGS、地理空间数据云网站下载帕隆藏布流域1987—2021年Landsat系列 (Landsat 5、Landsat 7、Landsat 8) 遥感影



注：数据来源于中国气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)。

图2 1961—2020年藏东南波密站气温和降雨变化

Fig. 2 Variations of air temperature and precipitation monitored at Bomi Meteorological Station in southeast Tibet during 1961-2020

表1 古乡沟、天摩沟、扎木弄沟基本特征及典型泥石流流事件

Tab. 1 Characteristics and typical debris flow events in Guxiang, Tianmo and Zhamunong gullies

	流域面积 (km ²)	主沟长度 (km)	高程 (m)	平均纵坡 (%)	泥石流暴发 时间	泥石流规模 (10 ⁶ m ³)	成因	参考 文献
古乡沟	25.2	8.7	6298~ 2530	25.6	1953.09.29	11	1950年地震引发滑坡堵塞沟谷上游形成堰塞体；1953年降雨和升温造成堰塞体溃决	[33-35]
					1975	/	冰崩	[33-35]
					2005.07.30— 08.06	0.3~0.4	升温及强降雨引发冰崩滑坡	[36]
					2020.07	/	降雨	本文
天摩沟	17.8	7.1	5560~ 2460	27.2	2007.09.04	~1.0	升温 and 降雨引发冰崩/岩崩/滑坡	[37-38]
					2010.07.25	0.1~0.5	强降雨和升温引发崩滑堵塞沟道，后溃决	[37-38]
					2010.09.03	0.1~0.5	降雨升温	[37-38]
					2018.07.11	0.18	升温及降雨引发岩崩	[39]
扎木弄沟	29.4	9.7	5616~ 2186	27.7	1900	510	前期降雨和升温	[40-41]
					2000.04.09	280~300	升温 and 降雨引起滑坡	[42-43]
					2015.08	0.06	降雨	[44]
					2020.07	0.01~0.1	降雨	本文

像数据，以比较典型泥石流事件发生前后河道平面形态变化。选取不同年份非汛期遥感影像进行解译分析，采用 ArcGIS、Photoshop 软件对影像进行波段合成、裁剪拼接等处理。为定量分析堰塞体上游河道分叉强度变化，采用辫状强度系数 BI_T 和 P_T 进行计算^[32]：

$$BI_T = \sum N_L / N_{XS}$$

(1)

$$P_T = \sum L_L / L_r$$

(2)

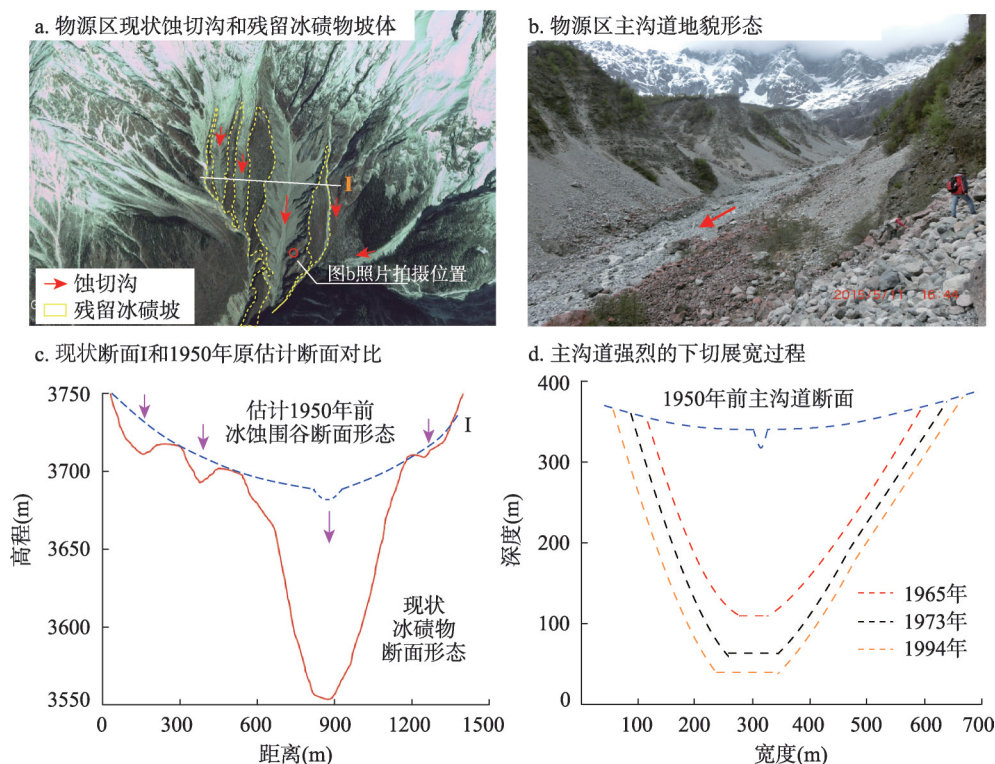
式中： BI_r 即河段平均汉道数（又称汉道数指数）； ΣN_L 为河段横断面总汉道数； N_{XS} 为河段等距分段后的横断面数； P_r 为河段汉道总长度与河段长度比值； ΣL_L 为河段所有汉道总长度（m）； L_r 为河段长度（m）。

3 结果

3.1 泥石流沟自身地貌的发育特征

泥石流的起动和演进伴随沟道短暂而剧烈的冲淤变化。泥石流的冲淤过程是泥石流和沟道相互作用的过程，其影响因素包括泥流体性质、流量、流速、侵蚀基准以及沟床和沟岸物质组成等。帕隆藏布流域的泥石流沟道上游物源区多为粒雪盆，蓄积冰川积雪、冰碛物等。受气候变化影响，帕隆藏布流域冰川积雪消融蚀退，如天摩沟上游冰川面积从2000年1.77 km²缩小到2013年1.42 km² [38]，大量原本受冰雪覆盖的冰碛物外露，为泥石流发生准备了适宜的物源和地形条件。

泥石流沟谷上游物源区的沟道地貌变化以下切、展宽和溯源蚀退为主要特征。古乡沟上游物源区是典型的高山冰蚀围谷，其内蓄积了巨量的冰碛物（和坡积物）。1950年以来，升温 and 降雨形成的冰川融雪径流及滑坡、崩塌、泥石流过程不断切割冰蚀围谷内的冰碛物坡体，沟道尺度规模不断增大，地形愈发破碎（图3a~3c）。基于文献[33]数据示意性勾勒的古乡沟上游主沟道（图3b）的断面变化（图3d）显示，自1953年古乡沟特大



注：断面I视角向上游，基于Google Earth高程数据生成；图b为2015年漆力健摄；图d数据来源于文献[33]。

图3 古乡沟上游物源区地貌发育过程

Fig. 3 Morphology evolution of the debris source area at the upper reach of the Guxiang Gully

泥石流发生后,其上游主沟道经历了强烈的冲刷切深和侧蚀展宽过程(1953—1965年更为显著),后由于物源区沟道下段逐渐切至基岩,其下切速率受到抑制,展宽速率也相应降低。同时,由于强烈的溯源侵蚀,主沟道末端向上游推进了约2 km。古乡沟物源区沟道的发育过程实际上就是“准”泥石流物源向真正泥石流转化的过程。需要指出,文献^[33]中古乡沟物源区主沟道深度与基于Google Earth、ASTER GDEM等地形高程数据提取得到的沟道深度相差较大,可能是断面位置不同或两个数据源各自误差累积所致,并不影响对沟道地貌变化过程基本特征的反映和刻画。

沟道中游一般为泥石流流通区,其冲淤变化主要受沟道物质构成的影响(图4)。古乡沟流通区主要为基岩峡谷,横断面形态基本没有变化,但由于峡谷出口近年布置泥石流拦挡工程,漂卵石在峡谷段堆积,断面淤积抬升(图4a)。天摩沟和扎木弄沟中游沟道主要由松散冰碛物或坡积物构成,仍以切深展宽过程为主(图4b~4c),为泥石流演进进一步提供物源补给,促进泥石流规模增大。



注:红色箭头示意坡积物滑坡崩塌,沟道下切展宽;图a余国安于2019年拍摄;图b~c余国安于2020年拍摄。

图4 泥石流沟中游流通区物源特征

Fig. 4 Debris mass characteristics of transferring section in the middle reaches of the three gullies

泥石流出口堆积扇的地貌形态变化受泥石流规模和径流强度共同影响。尽管处于泥石流运动活跃期的流域其沟口堆积扇一般多呈净淤积状态,但通常有显著的冲淤变化,其变化幅度与上游来水来沙过程密切相关。泥石流从上游搬运大量固体物质到出口堆积,整个过程历时短但强度大,堆积扇常显著淤积抬升。泥石流事件之间的间歇期,沟道形态变化缓慢,在水流持续冲刷作用下,沟床逐渐下切,其速率受水能量(由流量和坡降决定)、堆积扇物质构成等因素影响,而这些影响因素又与降水、气温、沟床物质组成(大颗粒粒径及粒径级配)息息相关。总体而言,泥石流事件引起沟口堆积扇淤积抬升,一般水沙过程(尤其汛期洪水过程)促进沟道冲刷下切。

基于沟口冲积扇4次(2020年汛前1次,汛后2次;2021年汛前1次)无人机航测生成高精度DEM,提取3条典型沟道冲积扇平面形态、主沟道纵剖面 and 典型横断面,分析泥石流沟道年内平面摆动和冲淤变化特征(图5~图10)。2020年汛期扎木弄沟和古乡沟均发生泥石流(时间7月11日左右,但具体暴发时间未知),天摩沟未发生泥石流。

由于上游物源减少及工程措施控制,2020年古乡沟(图5a)泥石流输送的固体颗粒被大量拦蓄于中游峡谷段(图6),进入沟道下游的泥石流规模很小或弱化为高含沙水流甚至山洪,沟道主流线发生显著横向摆动(图7a),且下游沟道冲刷下切(图8a、图9a)。天摩沟2020年没有发生泥石流事件,但是泥石流扇体形态发生变化,相对于2020年5月份,9月份扇体与帕隆藏布交汇处明显蚀退(图5b,红线),这主要是因为汛期帕隆藏布江水流流速和流量显著增大,剧烈淘蚀、冲刷扇体边缘,沟道主流线也有所摆动(图7b)。由于汛期未发生泥石流,缺乏高强度来沙,天摩沟沟道下游从2020年5月到2021年5月明显下切(图8b、图9b)。扎木弄沟泥石流事件搬运下来的泥沙几乎完全覆

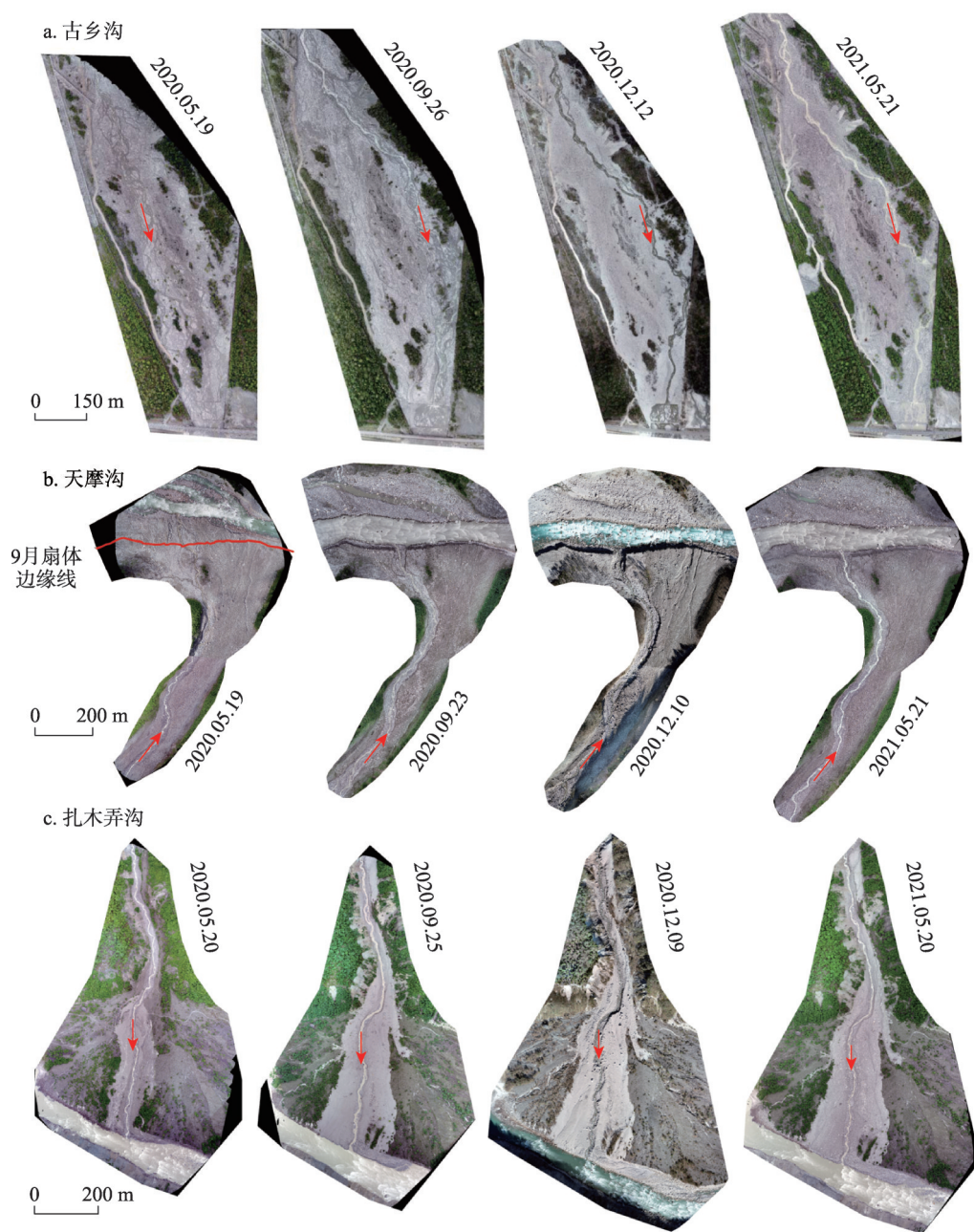


图5 基于无人机航拍数据生成的泥石流沟沟口堆积扇

Fig. 5 The deposit fans of the three gullies produced based on UAV data

盖原来的沟口冲积扇, 形成明显区别于周边环境的新泥石流堆积区, 扇体区域显著展宽、增大 (图 5c、图 10), 沟道主流线在局部区域发生摆动变化, 但幅度较小 (图 7c), 堆积扇横断面 2020 年 9 月明显高于 2020 年 5 月、12 月及 2021 年 5 月, 说明扇体在汛期显著淤积抬升, 非汛期侵蚀下切 (图 8c、图 9c)。

3 条泥石流沟出口冲积扇主流道纵剖面 and 典型横断面变化显示, 扇体冲淤变化汛期主要受上游泥沙输运 (尤其泥石流过程) 影响, 而非汛期主要受水流侵蚀影响。古乡沟



注：余国安于2020年拍摄。

图6 古乡沟中游峡谷出口泥石流工程设施拦蓄泥石流固相(视角向沟道上游)

Fig. 6 Engineering works built at the canyon outlet of the Guxiang Gully to intercept sediment (facing upstream of the gully)

泥石流由于受中游峡谷出口泥石流流格栅坝等工程措施的控制,漂石卵石等大粒径颗粒基本被拦挡,仅含沙水流进入沟口堆积扇,实际上强烈冲刷堆积扇,造成沟床下切,纵剖面线下移(图8a),且汛后主流道发生变化(图9a)。古乡沟沟口堆积扇的冲淤变化说明工程控制措施对于局部地貌过程有重要影响。天摩沟由于未发生泥石流,出口堆积扇明显侵蚀下切,尤其主沟道(图8b、图9b)。扎木弄沟由于汛期发生泥石流,沟口扇体显著淤积,非汛期则逐渐冲刷下切(图8c、图9c)。

3.2 泥石流对帕隆藏布河流地貌的影响

3.2.1 河道地貌形态变化

两岸发育有泥石流沟的河流,其地貌演变除受上游来水来沙影响外,相当程度上还受支流泥石流过程的影响。泥石流对主河的影响主要取决于泥石流规模(输沙强度)与主河水流强度的对比。大规模泥石流短时间内输送巨量泥沙进入主河,可能形成堰塞坝或水下堰塞体,部分甚至完全堵断主河,如扎木弄沟1900年滑坡泥石流堵塞易贡藏布形成易贡湖。近期,天摩沟四次大规模泥石流显著改变帕隆藏布河道平面形态(表1、图11、图12)。

大规模泥石流运动抬高入汇处主河的河床高度,压缩水流宽度,对入汇口附近主河道的水流结构和流态产生重大影响,进而引起河岸局部淘刷蚀退、凹凸冲淤等地貌强烈变化。天摩沟泥石流堵塞主河后,改变河流流向,主流呈折线冲向对岸,由此形成横向连锁反应,原来相对较为窄深的单一河道逐渐发育成宽阔游荡的辫状河道(图11、图12)。由于堰塞体抬高了入汇主河附近河段的侵蚀基准,长期影响下,堰塞体上游河床淤积抬升,将发育形成平缓、宽阔的河谷,而堰塞体下游河道冲刷作用变强,河道下切。

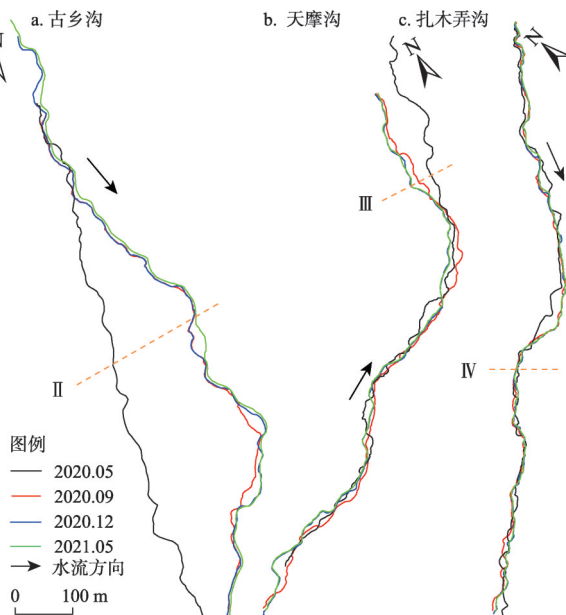


图7 3条泥石流沟出口冲积扇沟道主流线摆动情况

Fig. 7 Wandering of main stream of the three gullies before and after the flood season

3.2.2 平面河型变化 高强度泥石流运动输送巨量泥沙进入主河,也强烈影响河道平面形态(河型)发育。总体上,堰塞体上游由于泥沙淤积,河型由单一的窄深下切河道发育形成宽阔的辫状河道(多汉道系统)。基于1987—2021年古乡湖和易贡湖非汛期遥感影像(图13)解译分析,得到河道辫状强度系数 BI_T 和 P_T (图14)。

古乡湖和易贡湖河道辫状系数的变化显示(图14):①无泥石流事件时,两个湖区河段的辫状强度系数大体呈升高趋势,说明湖区河段汉道在逐渐发育(即大型汉道冲刷下切,新的汉道逐渐形成)。②泥石流事件通常引起主河河道辫状强度系数下降,但下降幅度受制于泥石流规模。如,2000年扎木弄沟巨型滑坡泥石流(规模2亿~3亿 m^3), BI_T 和 P_T 均显著下降。这个变化的主要原因在于泥石流过程输送泥沙淤高堰塞体,堰塞体上游水位相应上升,促进上游泥沙落淤。一方面,湖区水位上升使得原本出露水面的沙洲没入水下,汉道合并;另一方面,因堰塞体抬升,湖区上游河段来沙将更易于在湖区落淤,汉道数量和长度降低,因而辫状系数下降。相对而言,2015年和2020年扎木弄沟的泥石流规模要小很多(约1万~10万 m^3 量级), BI_T 和 P_T 原有的变化趋势(逐渐升高)基本没有改变。③泥石流事件后,随着堰塞体被水流冲刷而高度逐渐下降和湖区泥沙冲淤达到新的平衡,湖区河段汉道又开始发育,辫状系数逐渐上升。如此往复,循环变化。

4 讨论

4.1 河谷地貌稳定的负反馈响应

藏东南地区地壳运动活跃,更新世以来一直处于强烈抬升中。地壳抬升的同时伴随流水侵蚀,河床不断下切,河谷高差变大,坡体势能累积。随着坡体逼近临界平衡状态,势能的释放将成为偶然中的必然,滑坡、泥石流等地质灾害事件是势能释放的主要方式。气候变化(气温上升、降水增多)和地震等外营力均易引发滑坡、泥石流,将大量泥沙输运至主河,促使河床淤积抬升,并触发河床结构、水沙动态

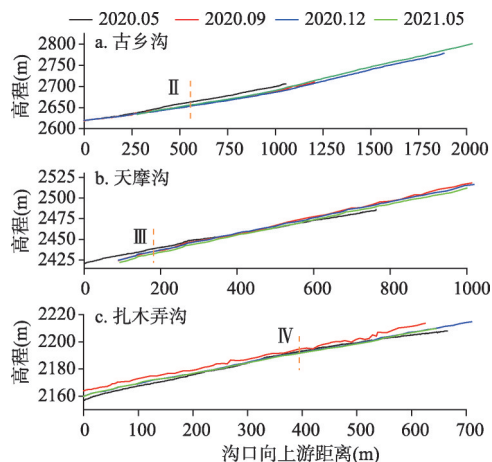


图8 沟口冲积扇主流道纵剖面冲淤变化

Fig. 8 Incision/siltation of the longitudinal profile of the main streams of the three gullies at the deposit fan

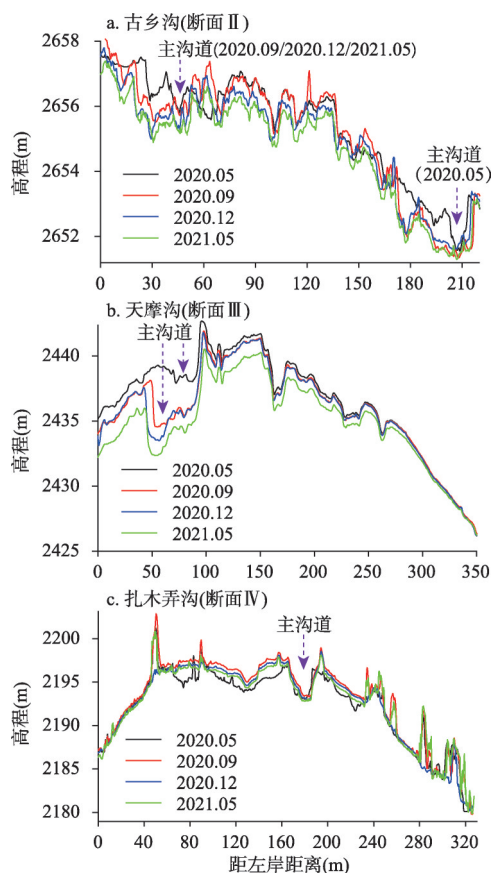
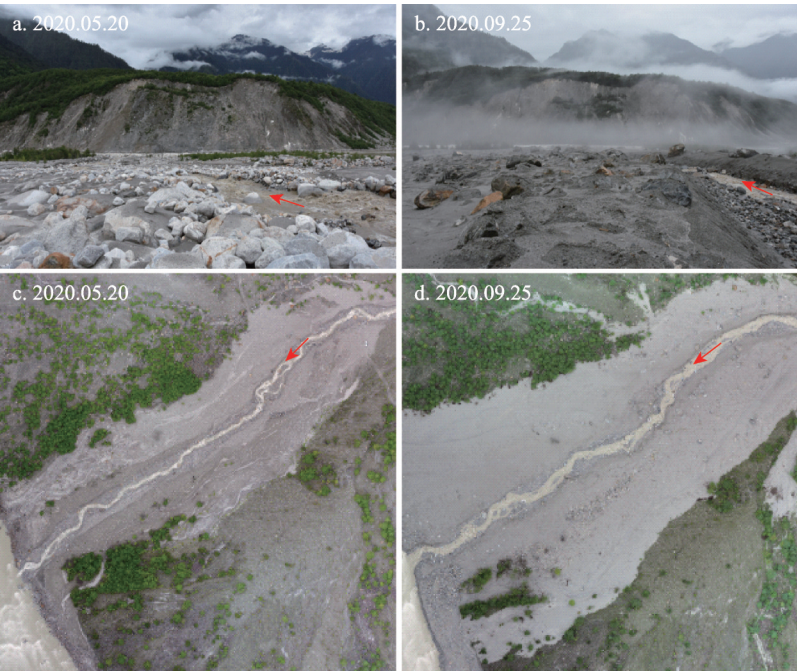


图9 汛期前后泥石流沟出口堆积扇典型横断面冲淤及主沟道摆动

Fig. 9 Variation of cross sectional profiles and wandering of main stream before and after the flood season



注：余国安于2020年拍摄。

图 10 2020 年汛期泥石流事件前后扎木弄沟沟口堆积扇冲淤变化

Fig. 10 Variation of deposit fan of Zhamunong Gully before and after debris flow in flood season in 2020



图 11 天摩沟泥石流事件前后帕隆藏布河流地貌变化

Fig. 11 Change of morphology of Parlung Zangbo River before and after debris flows from Tianmo Gully

和河流地貌相应发生变化，而这些变化反过来抑制岸坡进一步失稳，形成负反馈，促使河谷地貌进入新的相对稳定阶段（图 15）。因而，泥石流等高强度物质输移过程是区域地貌变化的重要驱动力。

4.2 河谷地貌的长期演变

峡谷地区河道由于受滑坡、泥石流等事件影响，入汇处的河床会显著淤积抬升，并可能形成堰塞体（尼克点），抬高侵蚀基准面。如果堰塞体维持稳定，则在长期尺度上，堰塞体上游河道冲刷作用减弱，逐渐转变为平缓宽阔的河谷；堰塞体下游河道继续侵蚀冲刷，下切过程占据主导地位，岸坡势能逐渐增加。随着坡体势能的不断累积，超过临界平衡后，岸坡失稳产生新的堰塞体，形成下一个尼克点。从整体上看，长期时间尺度

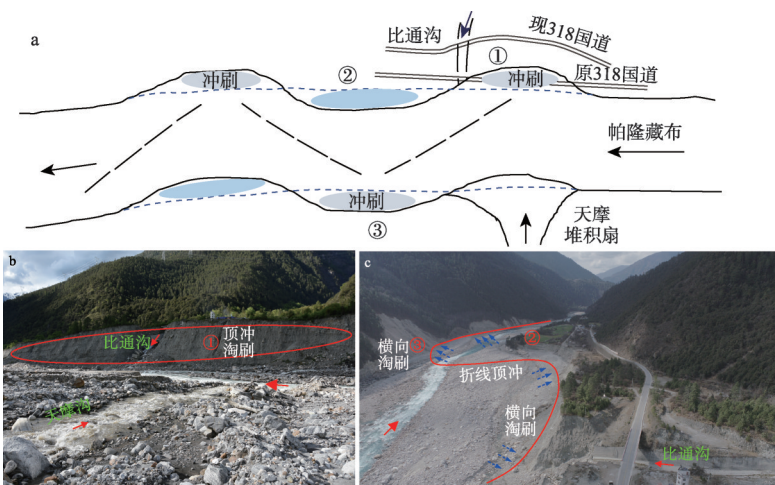


图 12 天摩沟泥石流引起帕隆藏布干流河岸冲淤横向连锁反应

Fig. 12 Cascade effects of lateral scouring/siltation of the Parlung Zangbo River caused by debris flows in Tianmo Gully

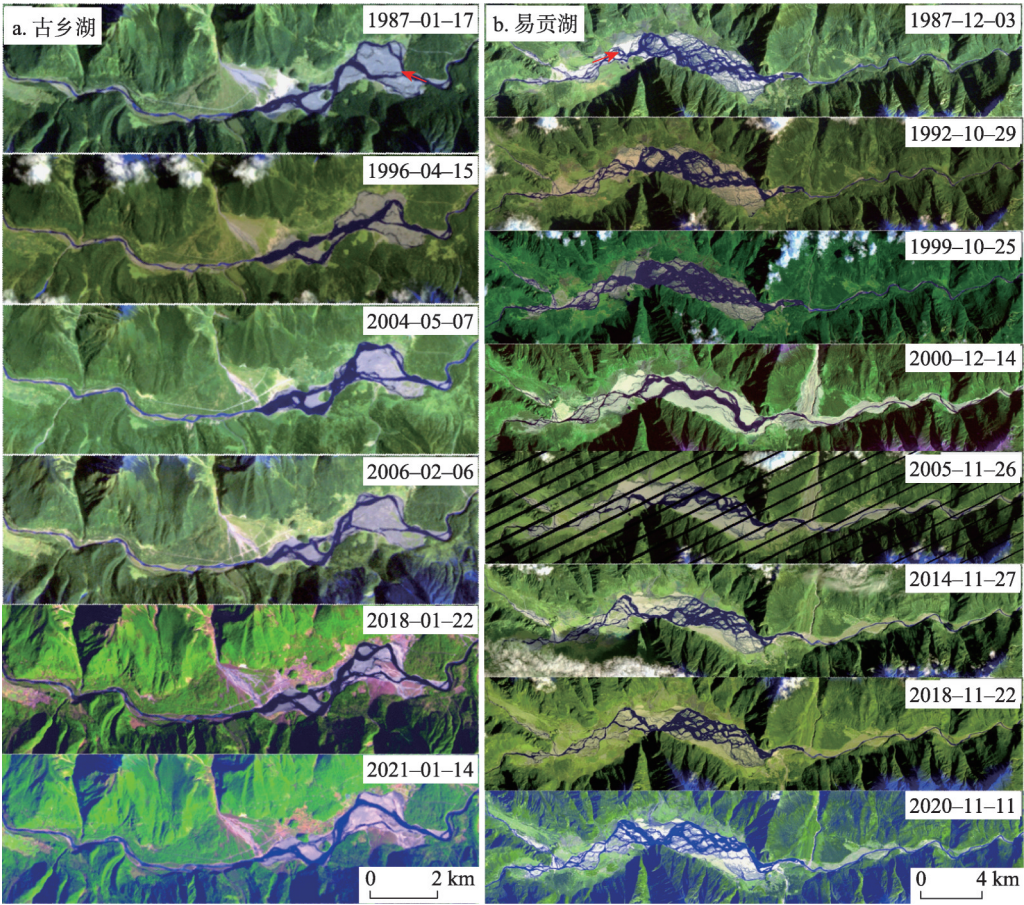
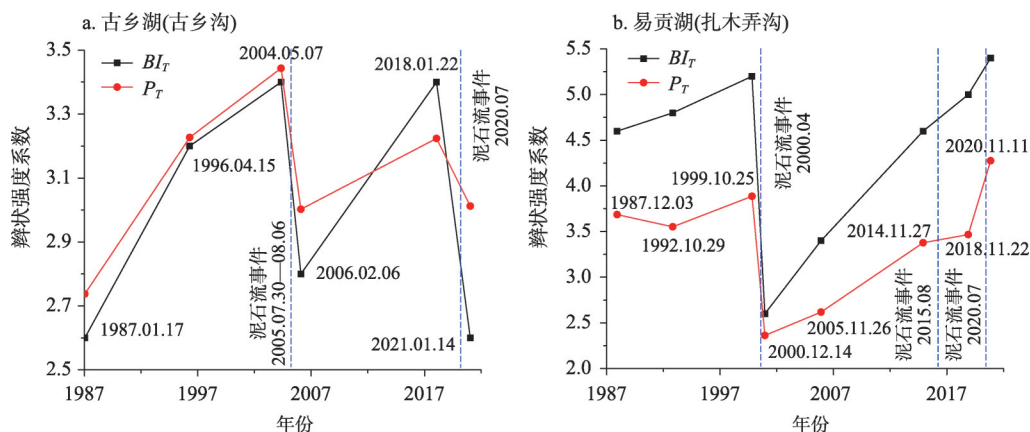


图 13 1987—2021 年古乡湖和易贡湖遥感影像

Fig. 13 Remote sensing images of Guxiang and Yigong lakes from 1987 to 2021



注：图中1987.12.03表示基于该日影像得到的河道辫状强度系数，其他类推。

图14 泥石流堰塞体上游河段辫状强度变化与泥石流事件的关系

Fig. 14 Relationship between braiding intensity of river reach upstream of the dam and debris flow events

影响下，帕隆藏布由单一下切河道逐渐演变成纵向上呈台阶状（图16）而平面上呈宽窄相间的“藕节状”的地貌形态^[45]。目前帕隆藏布流域已经形成波密古湖、波堆湖、古乡湖等明显尼克点，而天摩沟自从2007年发生泥石流以来，不断输运泥沙进入帕隆藏布，水下堰塞体增高，天摩沟未来能否会形成较为稳定的尼克点以及天摩沟下游是否会发生新的滑坡泥石流事件并形成新的尼克点值得关注。

4.3 气候变化背景下高山区物质输移主导形式(地质灾害类型)变化

高山区物质输运形式主要包括冰川运动、冰崩、雪崩、崩塌、滑坡和泥石流。末次冰盛期时，全球气温偏低，冰川面积广布，冰川运动占据主导地位，冰碛垄常沿沟谷向下运动深入主河，形成冰碛坝，目前帕隆藏布左岸仍分布众多冰碛坝遗迹（图17），这些冰碛垄（坝）多处于河谷阴坡。随着冰消期的到来，尤其是进入全新世，气候转暖变湿^[46]，冰川消融，冰碛物外露，滑坡、泥石流运动逐渐占据主导地位，形成众多滑坡体与泥石流堆积扇体，主要分布于帕隆藏布右岸（图17），位于河谷阳坡。近几十年来，由于全球气候变暖，泥石流逐渐成为其中最为重要的物质输运方式，且泥石流沟道由以前主要发育于阳坡开始向河谷阴坡发育（如天摩沟），说明在气候变化（主要为气温上升）的影响下，高山区物质输移的主要方式由冰川运动转变为滑坡、泥石流主导，且泥石流运动对河流地貌影响的重要性呈上升趋势。

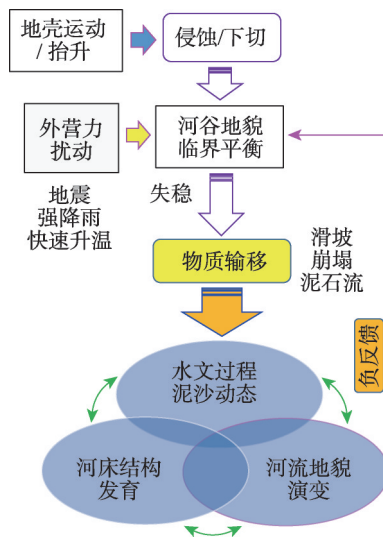


图15 河谷地貌负反馈效应示意图

Fig. 15 Schematic diagram showing the negative feedback of morphology evolution of valleys

5 结论

全球气候变化的大背景下，高山区坡体易于失稳，泥石流成为主要的灾害类型和物

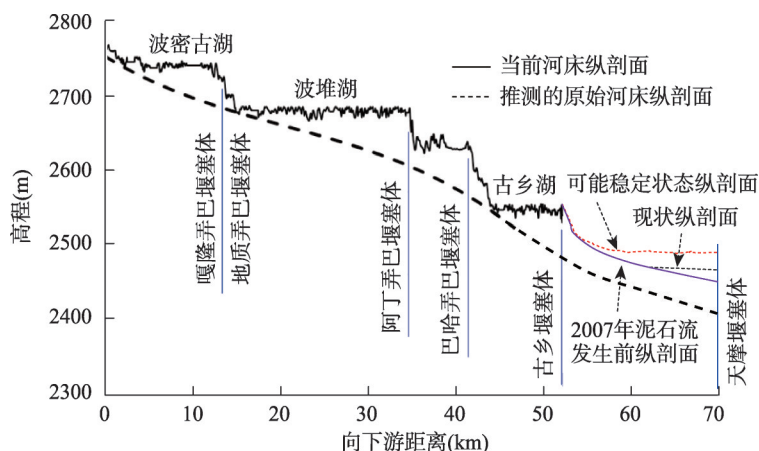


图 16 物质输移事件(冰溃坝推进、滑坡、泥石流等)长期影响塑造形成帕隆藏布干流台阶状纵剖面

Fig. 16 Longitudinal profile of a stretch reach of Parlung Zangbo developed by mass movements

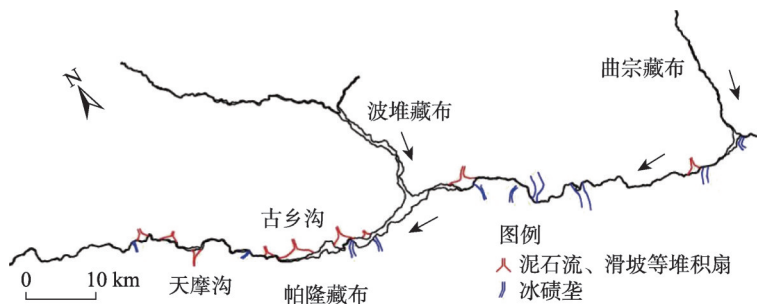


图 17 帕隆藏布流域地质灾害分布示意图

Fig. 17 Schematic diagram of different mass movements distributed along the valley of the Parlung Zangbo

质输移形式，也是高山区地貌变化的重要驱动力。藏东南帕隆藏布流域泥石流频发，泥石流小流域自身地貌剧烈变化，上游物源区沟道下切展宽和溯源蚀退，沟口堆积扇冲淤变化受控于泥石流事件规模和径流强度。泥石流过程显著影响主河地貌过程，造成主河河道横向冲淤和摆动，极端泥石流事件输运巨量泥沙进入主河，常形成堰塞体。堰塞体稳定维持后，上游河段平面形态向辫状河型转化，辫状强度受泥石流事件影响而波动变化。在长时间尺度上，主河道在纵剖面上形成台阶状而在平面上发育宽窄相间的藕节状地貌形态。未来应持续关注和研究典型高山区泥石流沟（如天摩沟和新暴发泥石流沟）的地貌变化及泥石流事件（尤其极端事件）对主河（帕隆藏布）河谷地貌和河道形态的影响。

参考文献(References)

- [1] Yao T, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 663-667.
- [2] Zemp M, Haeberli W, Hoelzle M, et al. Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L13504. DOI: 10.1029/2006GL026319.
- [3] Quincey D J, Glasser N F. Morphological and ice-dynamical changes on the Tasman Glacier, New Zealand, 1990-2007. *Global and Planetary Change*, 2009, 68(3): 185-197.
- [4] Evans S G, Bishop N F, Fidel Smoll L, et al. A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic

- mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 2009, 108(1/2): 96-118.
- [5] Haeberli W, Huggel C, Kääb A, et al. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002: An extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia, Russian Caucasus. *Journal of Glaciology*, 2004, 50(171): 533-546.
- [6] Guthrie R H, Friele P, Allstadt K, et al. The 6 August 2010 Mount Meager rock slide-debris flow, Coast Mountains, British Columbia: Characteristics, dynamics, and implications for hazard and risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12(5): 1277-1294.
- [7] Walter F, Amann F, Kos A, et al. Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology*, 2020, 351: 106933. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106933.
- [8] Stock J, Dietrich W E. Valley incision by debris flows: Evidence of a topographic signature. *Water Resources Research*, 2003, 39(4): 1089. DOI: 10.1029/2001WR001057.
- [9] Gabet E J, Bookter A. A morphometric analysis of gullies scoured by post-fire progressively bulked debris flows in southwest Montana, USA. *Geomorphology*, 2008, 96(3-4): 298-309.
- [10] Procter J, Cronin S J, Fuller I C, et al. Quantifying the geomorphic impacts of a lake-breakout lahar, Mount Ruapehu, New Zealand. *Geology*, 2010, 38(1): 67-70.
- [11] Wei Xueli, Chen Ningsheng. Development of debris flows in Guanba River and its effect on sediment deposition in Qionghai Lake of Sichuan. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 81-91. [魏学利, 陈宁生. 官坝河泥石流发育特征及对四川邛海的泥沙淤积效应. *地理学报*, 2018, 73(1): 81-91.]
- [12] de Haas T, Nijland W, de Jong S M, et al. How memory effects, check dams, and channel geometry control erosion and deposition by debris flows. *Scientific Reports*, 2020, 10: 14024. DOI: 10.1038/s41598-020-71016-8.
- [13] Schürch P, Densmore A L, Rosser N J, et al. Dynamic controls on erosion and deposition on debris-flow fans. *Geology*, 2011, 39(9): 827-830.
- [14] Shu Anping, Zhang Xin, Tang Chuan, et al. Analysis on the deposition processes and characteristics of non-homogeneous debris flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(11): 1333-1337, 1346. [舒安平, 张欣, 唐川, 等. 不同坡度条件下非均质泥石流堆积过程与特征. *水利学报*, 2013, 44(11): 1333-1337, 1346.]
- [15] Theule J I, Liébault F, Laigle D, et al. Channel scour and fill by debris flows and bedload transport. *Geomorphology*, 2015, 243: 92-105.
- [16] de Haas T, Woerkmom T. Bed scour by debris flows: Experimental investigation of effects of debris-flow composition. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41: 1951-1966.
- [17] Whipple K X, Dunne T. The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California. *Geological Society of America Bulletin*, 1992, 104(7): 887-900.
- [18] Jiang Zhongxin. Model of minimum energy dissipation in evolution of valley longitudinal profile of debris flow in Southeast Tibet area. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(1): 25-31. [蒋忠信. 藏东南泥石流沟纵剖面演化的最小功模式. *地理科学*, 2003, 23(1): 25-31.]
- [19] Iverson R M. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117: F03006. DOI: 10.1029/2011JF002189.
- [20] Lyu L Q, Wang Z Y, Cui P, et al. The role of bank erosion on the initiation and motion of gully debris flows. *Geomorphology*, 2017, 285: 137-151.
- [21] Liang Xinyue, Xu Mengzhen, Lyu Liqun, et al. Geomorphological characteristics of debris flow gullies on the edge of the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(7): 1373-1385. [梁馨月, 徐梦珍, 吕立群, 等. 基于地貌特征的青藏高原边缘泥石流沟分类. *地理学报*, 2020, 75(7): 1373-1385.]
- [22] Cui Peng, He Yiping, Chen Jie. Debris flow sediment transportation and its effects on rivers in mountain area. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(5): 539-549. [崔鹏, 何易平, 陈杰. 泥石流输沙及其对山区河道的影响. *山地学报*, 2006, 24(5): 539-549.]
- [23] Breien H, de Blasio F V, Elverhøi A, et al. Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides*, 2008, 5(3): 271-280.
- [24] Decaulne A, Saemundsson T. Geomorphic evidence for present-day snow-avalanche and debris-flow impact in the Icelandic Westfjords. *Geomorphology*, 2006, 80: 80-93.
- [25] Tibetan Plateau Scientific Expedition Team of Chinese Academy of Sciences. *Rivers and Lakes in Tibet*. Beijing: Science Press, 1984. [中国科学院青藏高原综合科学考察队. *西藏河流与湖泊*. 北京: 科学出版社, 1984.]
- [26] Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources of China, Institute of the Traffic Science, Tibet Autonomous Region. *A Study of Typical Mountain Hazards along Sichuan-Tibet Highway*. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Publishing House, 1999. [中国科学院成都山地

- 灾害与环境研究所, 西藏自治区交通科学研究所. 川藏公路典型山地灾害研究. 成都: 成都科技大学出版社, 1999.]
- [27] Mountaineering and Scientific Expedition Team of Chinese Academy of Sciences. *Geology of the Namcha Barwa Aera*. Beijing: Science Press, 1992. [中国科学院登山科学考察队. 南迦巴瓦峰地区地质. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [28] Tibetan Plateau Scientific Expedition Team of Chinese Academy of Sciences. *Glaciers in Tibet*. Beijing: Science Press, 1986. [中国科学院综合科学考察队. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [29] Shang Yanjun, Yang Zhifa, Yuan Guangxiang, et al. Development and Distribution of Geo-hazards along the Sichuan-Tibet Highway Adjacent to the Northern Side of the Yarlu Tsangpo Grand Canyon in Tibet, China. Beijing: China Railway Press, 2010. [尚彦军, 杨志法, 袁广祥, 等. 雅鲁藏布江大拐弯北部川藏公路地质灾害发育与分布研究. 北京: 中国铁道出版社, 2010.]
- [30] Yang Wei, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Characteristics of recent temperate glacier fluctuations in the Parlung Zangbo River basin, southeast Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(18): 1775-1780. [杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 近期藏东南帕隆藏布流域冰川的变化特征. 科学通报, 2010, 55(18): 1775-1780.]
- [31] Lu Jianying, Yu Guoan, Huang Heqing. Research and prospect on formation mechanism of debris flows in high mountains under the influence of climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(2): 555-567. [鲁建莹, 余国安, 黄河清. 气候变化影响下高山区泥石流形成机制研究及展望. 冰川冻土, 2021, 43(2): 555-567.]
- [32] Egozi R, Ashmore P. Defining and measuring braiding intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33: 2121-2138.
- [33] Zhu Pingyi, Luo Defu, Kou Yuzhen. Debris flow development trend of Guxiang ravine, Xizang. *Journal of Mountain Research*, 1997, 15(4): 296-299. [朱平一, 罗德富, 寇玉贞. 西藏古乡沟泥石流发展趋势. 山地研究, 1997, 15(4): 296-299.]
- [34] Hu Kaiheng, Cui Peng, You Yong, et al. Influence of debris supply on the activity of post-quake debris flows. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011, 22(1): 1-6. [胡凯衡, 崔鹏, 游勇, 等. 物源条件对震后泥石流发展影响的初步分析. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 1-6.]
- [35] Liu Jiankang, Cheng Zunlan. Meteorology conditions for frequent debris flows from Guxiang valley in Tibet, China. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(9): 45-49, 55. [刘建康, 程尊兰. 西藏古乡沟泥石流与气象条件的关系. 科学技术与工程, 2015, 15(9): 45-49, 55.]
- [36] Lu Anxin, Deng Xiaofeng, Zhao Shangxue, et al. Cause of debris flow in Guxiang valley in Bomi, Tibet Autonomous Region, 2005. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(6): 956-960. [鲁安新, 邓晓峰, 赵尚学, 等. 2005年西藏波密古乡沟泥石流暴发成因分析. 冰川冻土, 2006, 28(6): 956-960.]
- [37] Wei R Q, Zeng Q L, Davies T, et al. Geohazard cascade and mechanism of large debris flows in Tianmo gully, SE Tibetan Plateau and implications to hazard monitoring. *Engineering Geology*, 2018, 233: 172-182.
- [38] Deng M F, Chen N S, Liu M. Meteorological factors driving glacial till variation and the associated periglacial debris flows in Tianmo Valley, south-eastern Tibetan Plateau. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, 17(3): 345-356.
- [39] Gao Bo, Zhang Jiajia, Wang Junchao, et al. Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(5): 144-153. [高波, 张佳佳, 王军朝, 等. 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 144-153.]
- [40] Li Jun, Chen Ningsheng, Ouyang Chaojun, et al. Volume of loose materials and the analysis of possibility of blocking and dam break triggered by debris flows in Zhamunonggou. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(1): 80-84, 116. [李俊, 陈宁生, 欧阳朝军, 等. 扎木弄沟滑坡型泥石流物源及堵河溃坝可能性分析. 灾害学, 2017, 32(1): 80-84, 116.]
- [41] Zhu Pingyi, Wang Chenghua, Tang Bangxing. The deposition characteristic of supper debris flow in Tibet. *Journal of Mountain Research*, 2000, 18(5): 453-456. [朱平一, 王成华, 唐邦兴. 西藏特大规模碎屑流堆积特征. 山地学报, 2000, 18(5): 453-456.]
- [42] Yin Yueping. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Bomi, Tibet. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(4): 8-11. [殷跃平. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 8-11.]
- [43] Shang Y J, Yang Z F, Li L H, et al. A super-large landslide in Tibet in 2000: Background, occurrence, disaster, and origin. *Geomorphology*, 2003, 54: 225-243.
- [44] Wang Weiyu, Li Jun, Zhao Yuandi. Study on the relationship between rainfall frequency and mudslide outbreak frequency: Taking the mudslides in Zhamunonggou, Tibet, in August 2015 as an example. *Journal of Gansu Sciences*, 2020, 32(1): 60-65. [王伟宇, 李俊, 赵苑迪. 降雨频率与泥石流暴发频率关系研究: 以2015年8月西藏扎木弄沟泥石流为例. 甘肃科学学报, 2020, 32(1): 60-65.]
- [45] Yu G A, Lu J Y, Lyu L Q, et al. Mass flows and river response in rapid uplifting regions: A case of lower Yarlung

Tsangpo basin, southeast Tibet, China. *International Journal of Sediment Research*, 2020, 35(6): 609-620.

- [46] Li Bingyuan, Pan Baotian. Progress in paleogeographic study of the Tibetan Plateau. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 61-70. [李炳元, 潘保田. 青藏高原古地理环境研究. *地理研究*, 2002, 21(1): 61-70.]

Geomorphic effects of debris flows in high mountain areas of the Parlung Zangbo basin, southeast Tibet under the influence of climate change

YU Guoan¹, LU Jianying^{1,2}, LI Zhiwei³, HOU Weipeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: High altitude or high latitude mountain areas, especially alpine glaciers and rapidly shrinking permafrost regions, provide suitable topography and material source for the development of debris flow. Under the influence of climate change, such as rising temperature and increasing heavy rainfall events, the potential hazard inducing environment of alpine regions is more likely to trigger hazards. As an important natural hazard and mass flow type, debris flow has become an important driving force of geomorphologic evolution in alpine regions. However, few research reported debris flow processes and its geomorphologic effects in alpine regions due to the difficulty of field monitoring and lack of data. We first analyzed the morphologic effects of alpine debris flow based on a case study on the Parlung Zangbo basin (with three typical debris flow prone gullies, i.e., Zhamunong, Guxiang and Tianmo), located in southeast Tibet, where debris flow occurs frequently. Combined with remote sensing image, DEM data, UAV aerial photography, high-accuracy survey of RTK and field recording, the geomorphic development characteristics of debris flow gully (such as erosion-deposition variation and wandering) and its influence on river morphology of main channels were analyzed. The long-term evolution of river valley morphology under the influence of large-scale debris flow events was also discussed. The debris flow processes in alpine regions strongly shaped gully morphology. The upstream gully channel is eroded and expanded strongly, and the erosion-deposition variation of debris flow deposited fan is determined by the scale of debris flow events and flow intensity. Debris flows significantly affect the river morphology of a main channel, which lead to lateral scouring/silting and wandering of the main channel, and affect the planform channel pattern development of upstream of the landslide dam. In the long term, the river valley morphology would evolve into a wide and narrow alternating planform and a stair-case like longitudinal profile.

Keywords: debris flow; southeast Tibet; high mountains; geomorphic effect; long-term evolution